



## पवन टरबाइन ब्लेड नुकसान और विफलताएं: एक समीक्षा

अजय कुमार बंसल

इलेक्ट्रिकल इंजीनियरिंग विभाग, हरियाणा केंद्रीय विश्वविद्यालय, हरियाणा 123 031

### सारांश

पवन ऊर्जा स्रोत सबसे आवश्यक ऊर्जा स्रोतों में से एक है। कई देशों में पूरे देश की ऊर्जा आपूर्ति में पवन ऊर्जा की उत्पादन क्षमता में वृद्धि हुई है। पवन टरबाइन ब्लेड पवन टरबाइन के बहुत ही महत्वपूर्ण और महंगे घटकों में से एक हैं और उनका रख-रखाव बहुत कठिन काम है। टरबाइन ब्लेड का जीवन कुछ कारक पर निर्भर करता है जैसे कि सामग्री का क्षरण, झोंके, परिचालन संबंधी त्रुटियां, आग आदि। क्योंकि पवन टरबाइन आम तौर पर कठोर जलवायु में स्थापित होते हैं, ब्लेड की सतह उस स्थिति में काम करेगी जो टूटना, कटाव और विफलता का कारण बनती है। इसलिए, पवन टरबाइन ब्लेड के लिए खोज, रोकथाम और सुरक्षा के तरीके एक महत्वपूर्ण मुद्दा है। ब्लेड सतह सामग्री और कोटिंग प्रदर्शन में एक महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है, इस क्षेत्र में एक किफायती और व्यवहार्य समाधान खोजने के लिए गहन शोध चल रहा है। यह शोधपत्र पवन टरबाइन ब्लेड की रोकथाम और संरक्षण के तरीकों की समीक्षा प्रस्तुत करता है।

## Wind turbine blade damages & failures: A review

Ajay Kumar Bansal

Department of Electrical Engineering, Central University of Haryana, Haryana 123 031

### Abstract

Wind energy source is the one of the most essential energy sources. In many countries, generation capacity of wind energy is continuously increasing and percentage share of wind energy across entire nation energy generation is also increasing. The wind turbine blades are one of the very critical and costly components of the wind turbine and their maintenance is a very tough job. The life of the turbine blade suffers highly on some factors such as material degradation, gusts, erosion, operational errors, fires and cause of variable load. Because the wind turbines are generally installed in harsh climates, the blade surface will be operating in the condition which cause breakage, erosion and failure. Therefore, the detection, prevention and protection methods for wind turbine blades is a significant issue. The blade surface material and coating plays an important role in performance, the intensive research is going on in this area to find a economical and feasible solution. This paper presents a review of prevention and protection methods of wind turbine blade.

### प्रस्तावना

विश्व स्तर पर निरंतर जनसंख्या वृद्धि, आर्थिक विकास और रहने की स्थिति की बेहतरी के कारण, ऊर्जा की खपत भी तेजी से बढ़ी है। विद्युत ऊर्जा उत्पन्न करने का मुख्य स्रोत जीवाश्म ईंधन है। जीवाश्म ऊर्जा सीमित है, इसलिए अक्षय ऊर्जा स्रोतों की ओर ध्यान जा रहा है। मुख्य अक्षय ऊर्जा स्रोत पवन, सौर, भूतापीय और ज्वार की ऊर्जा हैं। वर्ष 2000 के दशक से पवन ऊर्जा उद्योग तेजी से बढ़ा है (चित्र- 1)। अंतर्राष्ट्रीय पवन क्षमता 2019 के अंत तक 651 गीगावाट के करीब पहुंच गई है<sup>1</sup>। पवन

ऊर्जा में चीन विश्व में अग्रणी है, दुनिया की क्षमता का एक तिहाई से अधिक (लगभग 221 गीगावाट ) उत्पादन करता है। अमेरिका ने 2030 तक पवन ऊर्जा के माध्यम से देश की बिजली का बीस प्रतिशत उत्पादन करने की लक्ष्य रखा है। 2018 में उच्च ऊर्जा की मांग के कारण, वैश्विक ऊर्जा से संबंधित CO<sub>2</sub> उत्सर्जन 33.1 Gt CO<sub>2</sub> के ऐतिहासिक उच्च स्तर पर पहुंच गया। 2018 में नवीकरणीय ऊर्जा के अधिक उपयोग से CO<sub>2</sub> उत्सर्जन पर प्रभाव पड़ा, 215 माउंट उत्सर्जन से बचा गया, जिनमें से अधिकांश बिजली क्षेत्र में नवीकरणीयों के उपयोग के कारण है<sup>2</sup>।

यूरोपीय परिषद् ने अक्टूबर 2014 में 2030 के लिए लक्ष्य निर्धारित किया है कि ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन में कम से कम 40% कटौती (1990 के स्तर से), अक्षय ऊर्जा के लिए कम से कम 32% हिस्सेदारी और ऊर्जा दक्षता में कम से कम 32.5% सुधार किया जाएगा।

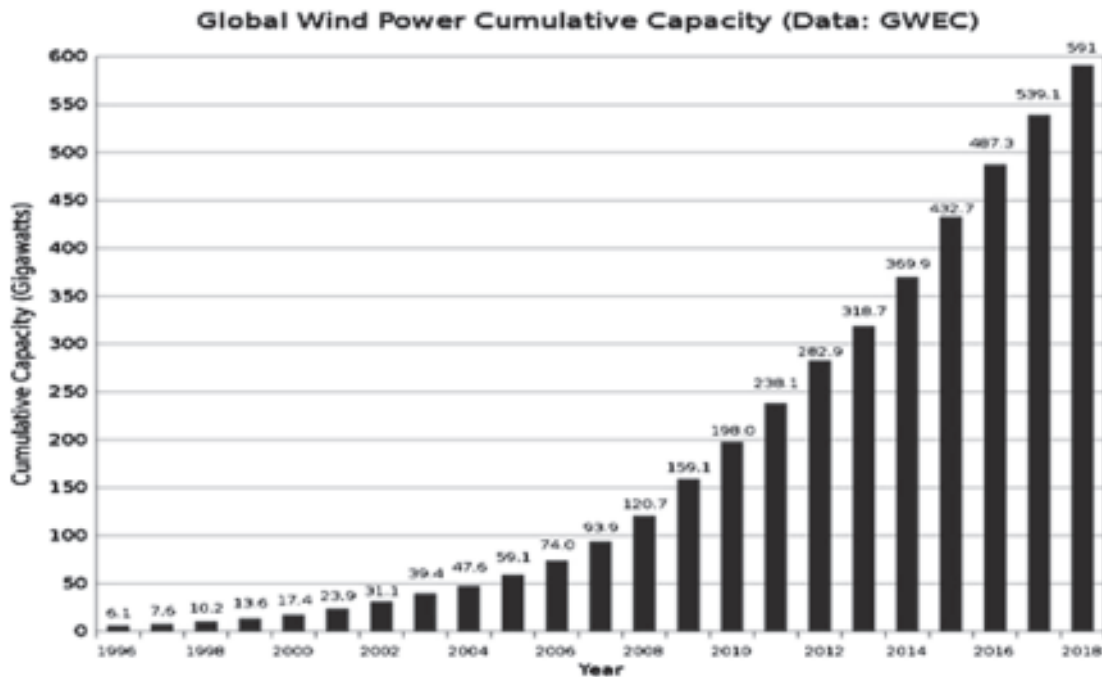
जर्मनी ऐतिहासिक रूप से नवीकरणीय ऊर्जा में एक वैश्विक नेता रहा है। बिजली उत्पादन के लिए, जर्मनी के पास नवीकरणीय स्रोतों के लिए 2020 तक सकल बिजली की खपत का कम से कम 35% हिस्सा रखने का लक्ष्य है। 2018 में, यह हिस्सेदारी पहले से ही लगभग 38% हो गई। जुलाई 2020 को जर्मनी ने 2030 तक बिजली क्षेत्र में नवीकरणीय ऊर्जा के लिए विस्तार लक्ष्य को 65% तक बढ़ा दिया। जर्मनी में 29,844 पवन टरबाइन हैं, जिनकी क्षमता लगभग 56 गीगावॉट है। पवन-निर्मित बिजली ने अक्षय ऊर्जा का सबसे बड़ा हिस्सा उत्पादित किया, जो लगभग 49% है। जर्मनी अक्षय ऊर्जा और ऊर्जा दक्षता पर एक व्यापक अनुसंधान एवं विकास कार्यक्रम का अनुसरण करता है। पवन ऊर्जा अनुसंधान और विकास के प्रयासों में बड़े पवन टरबाइन घटक (जैसे रोटर ब्लेड और ड्राइव ट्रेन) शामिल हैं जो भूमि-आधारित रसद आवश्यकताओं और उप-निर्माण के लिए अपतटीय मांगों को ध्यान में रखते हैं<sup>5</sup>। आने वाले दशकों में बड़े और अधिक शक्तिशाली पवन मिलों का निर्माण किया जाएगा और

मिलों की सुरक्षा इसमें एक प्रमुख भूमिका निभाएगी। टरबाइन ब्लेड के संचालन के दौरान अत्यधिक तनाव होता है और एक ब्लेड टूटने से एक बड़ा आर्थिक नुकसान हो सकता है<sup>4</sup>।

टरबाइन ब्लेड में ग्लास फाइबर प्रबलित प्लास्टिक (GFRP) और सैंडविच क्षेत्र होते हैं जिनमें लकड़ी या प्लास्टिक फोम होते हैं। ब्लेड को दो हिस्सों के रूप में निर्मित किया जाता है और बाद में एक साथ चिपका दिया जाता है<sup>5</sup>। ब्लेड की क्षति से अचानक संरचनात्मक विफलता हो सकती है और उन्हें ठीक करने के लिए संबंधित लागत अधिक होती है। इसलिए, विनिर्माण चरण, परिवहन और संचालन में दोषों को रोकने के लिए क्षति के कारण की पहचान करना महत्वपूर्ण है<sup>6</sup>।

### पवन टरबाइन प्रणाली

पवन टरबाइन एक रोटर के आस-पास स्थित दो से तीन वायुगतिकीय ब्लेड के पवन-प्रेरित रोटेशन के माध्यम से बिजली उत्पन्न करते हैं। रोटर मुख्य शाफ्ट जनरेटर से जुड़ा होता है जो बिजली बनाने के लिए घूमता है<sup>4</sup>। हमने पवन टरबाइन को 100 kW से छोटा और 6,000 kW से बड़ा देखा है। पवन टरबाइन एक विशेष सुविधा पर एकल उपकरण (जैसे एक सिंचाई सिंचाई पंप) को चलाने के लिए बिजली उत्पन्न कर सकते हैं या पावर ग्रिड को बिक्री के लिए बिजली का उत्पादन कर सकते हैं<sup>7</sup>।



चित्र 1 – वैश्विक पवन ऊर्जा संचयी क्षमता<sup>1</sup>

### पवन टरबाइन प्रणाली के मुख्य घटक हैं:

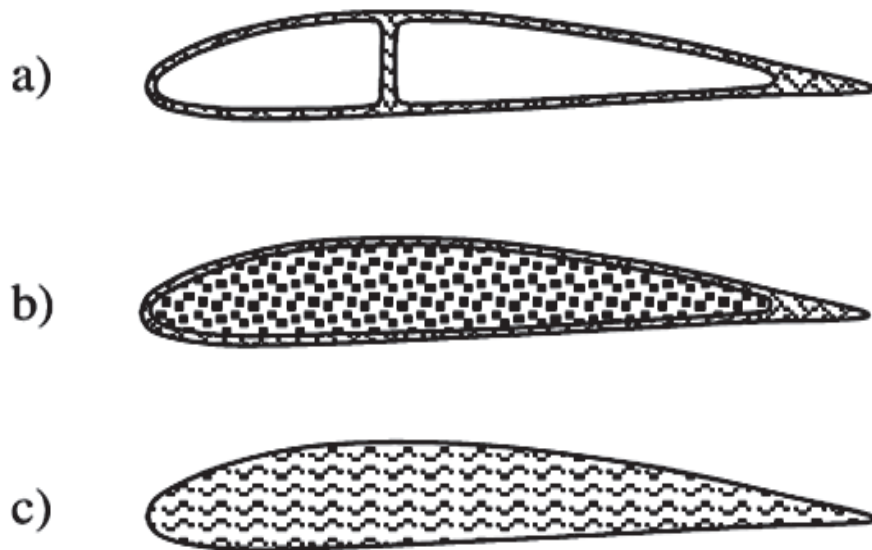
- टॉवर, ट्यूबलर स्टील कंक्रीट या स्टील जाली से बना,
- फाउंडेशन, टरबाइन टॉवर, नैकेल और रोटर ब्लेड के लिए;
- नैकेल: यह टरबाइन के यांत्रिक, विद्युत, इलेक्ट्रॉनिक और अन्य घटकों को रखता है;
- रोटर ब्लेड, घूमता है और रोटर को स्पिन करने का कारण बनता है;
- ट्रांसफार्मर
- जनरेटर, जो यांत्रिक (घूर्णी) ऊर्जा से एसी बिजली का उत्पादन करता है;
- रोटर, यह ब्लेड और हब द्वारा बनता है;
- ब्रेक: जो रोटर को रोकता है;
- गियर बॉक्स: जो कम और उच्च गियर शॉफ्ट के बीच घूर्णी गति को 1,000-1,800 आरपीएम तक बढ़ाता है;
- इलेक्ट्रॉनिक नियंत्रण कक्ष
- शॉफ्ट (कम और उच्च गति) रोटर को जनरेटर से जोड़ना
- ब्लेड पावर कंट्रोल सिस्टम (ब्लेड पिच को नियंत्रित करता है);
- एनीमोमीटर (पवन गति नियंत्रण) और पवन फलक (पवन दिशा नियंत्रण)

### पवन टरबाइन ब्लेड संरचनाएं

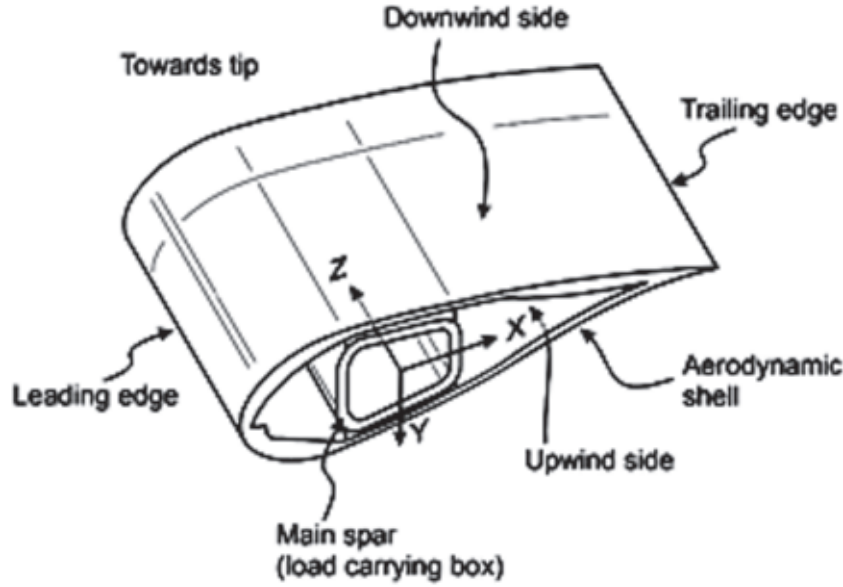
आजकल, पवन टरबाइन ब्लेड का निर्माण उत्कृष्ट प्रदर्शन प्राप्त करने के लिए संरचनात्मक अखंडता और वजन के बीच संतुलन के आधार पर किया जाता है। एक पवन टरबाइन रोटर ब्लेड संरचना को इसकी बाहरी ज्यामिति और आंतरिक संरचनात्मक के संदर्भ में परिभाषित किया गया है। यह विभिन्न सामग्रियों से बनाया जा सकता है<sup>9</sup>। एक टरबाइन ब्लेड डिजाइन एक आयताकार खोखले बीम (स्पार) में लोड-लेने वाले लेमिनेशन पर आधारित है (चित्र 3)। एक अन्य सामान्य ब्लेड डिजाइन में, कोई स्पार नहीं है; इसके बजाय दो शीयर वेब्स के साथ एयरो शेल में लोड-लोडिंग लेमिनेट का संयोजन है<sup>8</sup>। एयरो शेल के बीम स्पार और सैंडविच फेस शीट्स को फाइबर प्रबलित पॉलीमर कंपोजिट मैटीरियल (आकृति 2) से बनाया जाता है; सैंडविच कोर पॉलीमरिक फोम या बाल्सा लकड़ी से बनाया जाता है और ब्लेड को प्रमुख किनारे पर एयरो के गोले के बीच चिपकने वाले के साथ इकट्ठा किया जाता है (चित्र 2)<sup>9</sup>।

### पवन टरबाइन ब्लेड नुकसान और विफलताएं

रोटर ब्लेड लगभग 20 से 25 साल के लिए बनाए जाते हैं। इस अवधि के दौरान, डाउनटाइम्स जो ब्लेड पर बहुत कम कठोर होते हैं और बहुत भारी उपयोग की अवधि, दोनों एक-दूसरे के वैकल्पिक होते हैं। रोटर ब्लेड पर बिजली या भारी ओलों का



चित्र 2 – पवन टरबाइन ब्लेड क्रॉस-सेक्शन के तीन मुख्य प्रकार: ए) शेल आकार की आंतरिक संरचना (मजबूत करना) के साथ मजबूत करना बी) शेल आकार का ब्लेड (रोविंग) फोम कोर (पॉलीयुरेथेन) सी के आकार का ब्लेड पूरी तरह से भरे ढांचे के साथ।



चित्र - 3 पवन टरबाइन का ब्लेड

भारी असर होता है। संचालन के दौरान टूट-फूट और सामान्य उम्र बढ़ने की प्रक्रिया से यह पता चलता है कि रोटर ब्लेड कब तक चलता रहेगा<sup>10</sup>। इन सभी ब्लेड घटकों में कई प्रकार के नुकसान और विफलताएं हो सकती हैं (तालिका 1 देखें) जो कि परिचालन पवन टरबाइनों में देखी जा सकती हैं। रोटर ब्लेड की सामग्री प्रभावित होने से पहले ही आंतरिक और बाहरी प्रभाव ब्लेड की कोटिंग को नुकसान पहुंचाते हैं<sup>10</sup>। हवा में ठोस पदार्थ, जैसे रेत या धूल के मोटे कण, विशेष रूप से प्रवाह किनारों पर कठोर होते हैं। हालांकि, कोटिंग का सबसे खराब दुश्मन बारिश है। उनके अपेक्षाकृत बड़े वजन और उच्च गतिज ऊर्जा के कारण, वर्षा बूंदों का कोटिंग पर हानिकारक प्रभाव पड़ता है<sup>11</sup>। अंत में, फाइबर-प्रबलित कंपोजिट में क्षरण होता है। क्षरण विशेष रूप से मजबूत होता है, जब ड्रॉप ऊंचाई से उत्पन्न गतिज ऊर्जा घूर्णन ब्लेड की अधिकतम ऊर्जा के साथ मेल खाती है। कटाव वायुगतिकीय गुणों के लिए हानिकारक है और ऊर्जा पैदावार को काफी कम कर देता है<sup>12</sup>।

जबकि क्षति को रोटर ब्लेड के एक सामान्य ओवरहाल के माध्यम से ठीक किया जा सकता है, ब्लेड को हटाने, मरम्मत और संयोजन करने में बहुत समय लगता है और इसलिए पैसा खर्च होता है। विकल्प निलंबित ब्लेड पर एक पॉलीयुरेथेन-आधारित (PUR) कोटिंग है। इस पर आमतौर पर छिड़काव किया जाता है<sup>13</sup>। PUR कोटिंग्स को विशेष रूप से टिकाऊ माना जाता है

सारणी 1 – नुकसान और विफलताएं ऑपरेशन के समय ब्लेड घटकों में	
ब्लेड घटक	नुकसान और विफलता
संयुक्त रूट (Root Joint)	दरारें, झुर्रियाँ
गोले (Shells)	विभाजन और अनुप्रस्थ दरारें, प्रदूषण, संबंध टूटना
स्पार (Spar)	क्रैक, झुर्रियाँ, सैंडविच और चिपकने वाली संबंध टूटना, प्रदूषण
अग्रणी-किनारे (leading Edge)	क्षरण, चिपकने वाला संबंध टूटना, विभाजन दरारें
अनुगामी किनारे (trailing Edge)	अनुदैर्घ्य और अनुप्रस्थ दरारें, चिपकने वाला संबंध टूटना

और इसमें उच्च यूवी प्रतिरोध होता है। कोटिंग की लोच रोटर ब्लेड की प्रमुख विशेषताओं में से एक है। यह दरार संरचनाओं के लिए अग्रणी के बिना एक चक्र के दौरान ब्लेड के विरूपण को अच्छी तरह से अवशोषित करता है<sup>14</sup>। एक परत की सामान्य मोटाई केवल 300 माइक्रोमीटर से अधिक नहीं होती है।

टरबाइन ब्लेड के संरचनात्मक स्वास्थ्य की निगरानी करना विशेष रूप से महत्वपूर्ण है क्योंकि वे कुल टरबाइन लागत का 15-2% खर्च करते हैं। इसके अलावा, ब्लेड की क्षति सबसे महंगी प्रकार की क्षति है और ब्लेड की विफलता के कारण बनाए गए असंतुलन में घुमाने के कारण पवन टरबाइन प्रणाली को गंभीर

नुकसान पहुंचा सकती है<sup>15</sup>। इसलिए, यह आवश्यक है कि एक संरचनात्मक स्वास्थ्य निगरानी (SHM) प्रणाली को दोषों की निगरानी करने के लिए पवन टरबाइन के डिजाइन में शामिल किया जाए ताकि वे एक भयावह विफलता का कारण न बन सकें। पवन टरबाइन के मुख्य भाग, टावर, गियर और टरबाइन ब्लेड लगातार हवा के संपर्क में आते हैं और अत्यधिक तनावग्रस्त हो जाते हैं<sup>16</sup>। लेकिन वर्तमान स्थिति में चेकअप के तरीके बेहद कठिन हैं। वर्तमान विधियां मुख्य रूप से दृश्यमान चेकअप और भौतिक संलग्न परीक्षाओं पर आधारित इन विधियों के लिए एक विशेषज्ञ की आवश्यकता होती है और प्रारंभिक चरण में आंतरिक क्षति का पता लगाने के लिए वे पर्याप्त कुशल नहीं होते हैं<sup>17</sup>। वर्तमान में पवन टरबाइन ब्लेड ज्यादातर फाइबर प्रबलित प्लास्टिक के माध्यम से बनाये जाते हैं जो प्लास्टिक फोम या लकड़ी जैसे पंख वाले पदार्थों के साथ विलय किये जाते हैं। ग्लास फाइबर प्रबलित प्लास्टिक (GFRP) को कीमत की वजह से कार्बन फाइबर प्रबलित प्लास्टिक (CFRP) की तुलना में पसंद किया जाता है।

#### पवन टरबाइन ब्लेड क्षरण

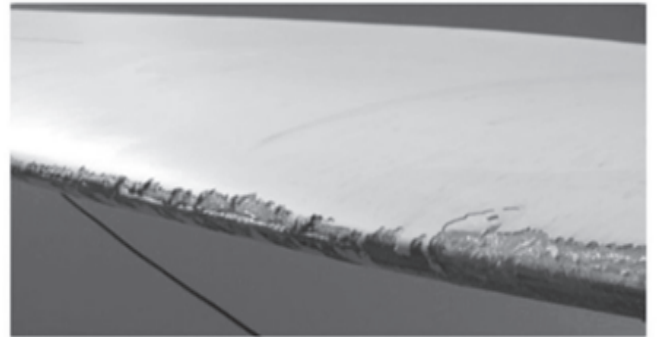
ठोस या द्रव कणों के बार-बार ठोस सतह से टकराने के कारण होने वाले प्रगतिशील भौतिक हानि को क्षरण के रूप में परिभाषित किया जाता है। यद्यपि क्षरण एक प्रभाव है जिसे सतह की क्षति के कारण आसानी से पहचाना जा सकता है, क्षरण विभिन्न रूपों में होता है। क्षरण का महत्वपूर्ण रूप, ठोस कणों, धूल, आवेग, बूंदों और गुहिकायन के कारण होता है<sup>18</sup>।

ठोस कण का क्षरण, लगातार टकराने से शरीर की सतह पर होने वाली क्षति है। इम्पेन्जेशन का क्षरण मुख्य रूप से तब होता है जब एक तरल धारा एक ठोस सतह पर फ्रैक्चर का कारण बनती है, जिसे जंग के साथ जोड़ा जा सकता है<sup>19</sup>। बूंद का क्षय भी बूंदों के तरल प्रवाह के कारण होता है। अंत में, कैविटी का क्षरण तब होता है जब एक तरल ढहने के भीतर गैस गुहाओं या बुलबुले में प्रवेश किया जाता है।

#### पानी की बूंदों/बारिश का क्षरण

पानी की छोटी बूंद का कटाव, तरल बूंदों के उच्च गति से टरबाइन ब्लेड गिरने से होता है। इस समस्या को पारंपरिक रूप से तरल क्षरण के रूप में भी जाना जाता था। पानी की बूंदों का क्षरण, उच्च गति वाले ठोस सतहों के लंबे समय से पानी की बूंदों भरे वातावरण में रहने के कारण होता है<sup>20</sup>। पानी की बूंदों का क्षरण घटना में असतत पानी की बूंदों को तरल जेट कटाव और गुहिकायन से अलग करके देखा जाता है। तरल जेट के कारण

होने वाले असतत पानी की बूंद का प्रभाव गुहिकायन से होने वाले प्रभाव से काफी अधिक है। कई प्रकार की टरबाइन ब्लेड, पानी की बूंदों क्षति से विशेष रूप से प्रभावित होते हैं<sup>21</sup>। कम दबाव (एलपी) चक्र के ब्लेड पर पानी की छोटी बूंद की क्षति बहुत देखी जाती है। इसका कारण यह है कि भाप टरबाइन डिजाइनर आमतौर पर टरबाइन ब्लेड की लंबाई को कम दबाव के चक्र में अधिकतम रखते हैं ताकि आउटपुट ऊर्जा और टरबाइन की समग्र दक्षता में सुधार हो सके। ब्लेड की लंबाई बढ़ने से ब्लेड की नोक की गति बढ़ जाती है<sup>22</sup>। गीले वातावरण में ऐसी उच्च गति, ब्लेड में क्षरण का कारण बनती है (चित्र-4)। प्रयोग के एक लंबे इतिहास से पता चला है कि पानी की बूंदों का क्षरण एक समय पर निर्भर घटना है, अर्थात्, यह अलग-अलग समय अंतराल पर विभिन्न क्षरण दर प्रदर्शित करता है। यह अलग-अलग समय अंतराल पर अलग-अलग कटाव की दर प्रदर्शित करता है, जिसके परिणामस्वरूप क्षति की एक गैर-रेखीय प्रगति होती है<sup>23</sup>। कटाव वक्र को पांच अलग-अलग क्षेत्रों या चरणों में विभाजित किया जा सकता है। पहला चरण ऊष्मायन अवधि, दूसरा चरण त्वरण अवधि, तीसरा चरण अधिकतम क्षरण अवधि, चौथा चरण मंदी या क्षीणन अवधि, पांचवां चरण टर्मिनल स्थिर क्षरण अवधि<sup>8</sup>। इस बात पर चर्चा हुई है कि व्यावहारिक दृष्टिकोण से कौन सा क्षरण चरण सबसे महत्वपूर्ण है। एक ओर, यह तर्क दिया गया कि चूंकि घटक अपने जीवन का अधिकांश समय मंदी के चरण (चौथा चरण) में बिताते हैं, इसलिए उस स्तर पर क्षरण दर का उपयोग क्षरण क्षति के उपाय के रूप में किया जाना चाहिए<sup>24</sup>। दूसरी ओर, अन्य ने तर्क दिया कि स्टेज डी पर कटाव क्षति का स्तर इतना गंभीर हो सकता है कि घटक न केवल अपने प्राथमिक कार्य को खो देते हैं, बल्कि अब सेवा करने योग्य नहीं हो सकते<sup>25</sup>। इसलिए, कटाव क्षति को चिह्नित करने के लिए तीसरा चरण और/या ऊष्मायन अवधि की कटाव दर का उपयोग किया जाना चाहिए।



चित्र 4 – किनारे का कटाव

कटाव क्षति तंत्र काफी हद तक प्रभाव की स्थिति (विशेष रूप से प्रभाव वेग) और लक्ष्य सामग्री की गतिशील प्रतिक्रिया पर निर्भर करता है<sup>26</sup>।

### अग्रणी-किनारे का क्षरण

पवन उद्योग के लिए अग्रणी-किनारे का क्षरण एक महत्वपूर्ण मुद्दा है। पवन टरबाइन का प्रदर्शन काफी हद तक इसके ब्लेड के वायुगतिकीय गुणों पर निर्भर करता है। अग्रणी-किनारे का क्षरण बारिश की बूंदों, ओलों या ब्लेड के प्रमुख किनारे को प्रभावित करने वाले अन्य कणों के कारण होता है<sup>27</sup>। ये ब्लेड की सतह पर एक खुरदुरे प्रोफाइल को छोड़ते हैं जो वायुगतिकीय प्रदर्शन को कम करते हैं और ब्लेड की संरचनात्मक अखंडता को प्रभावित करते हैं। किनारे के कटाव के परिणामस्वरूप एक खुरदरा ब्लेड प्रोफाइल दिखाई देती है जो प्रारंभिक पटलीय अशांत संक्रमण को उत्तेजित करती है। अग्रणी-किनारे का क्षरण समय पर निर्भर करता है। पहले वर्ष में, अग्रणी-किनारे का क्षरण न्यूनतम होता है, दूसरे वर्षों में 1 वर्ष की तुलना में अधिक होता है। 10 वर्षों की सेवा में अग्रणी-किनारे का क्षरण तेजी से बढ़ जाता है और इसके बाद दिन-प्रतिदिन बढ़ जाता है (चित्र-5)<sup>28</sup>।

ईसेनबर्ग एट अल ने लोडिंग एज कटाव की विशेषताओं को समझाया है<sup>29</sup>:

- प्रथम चरण में टॉपकोट में केवल छोटे खरोज (छेद) मौजूद होते हैं।

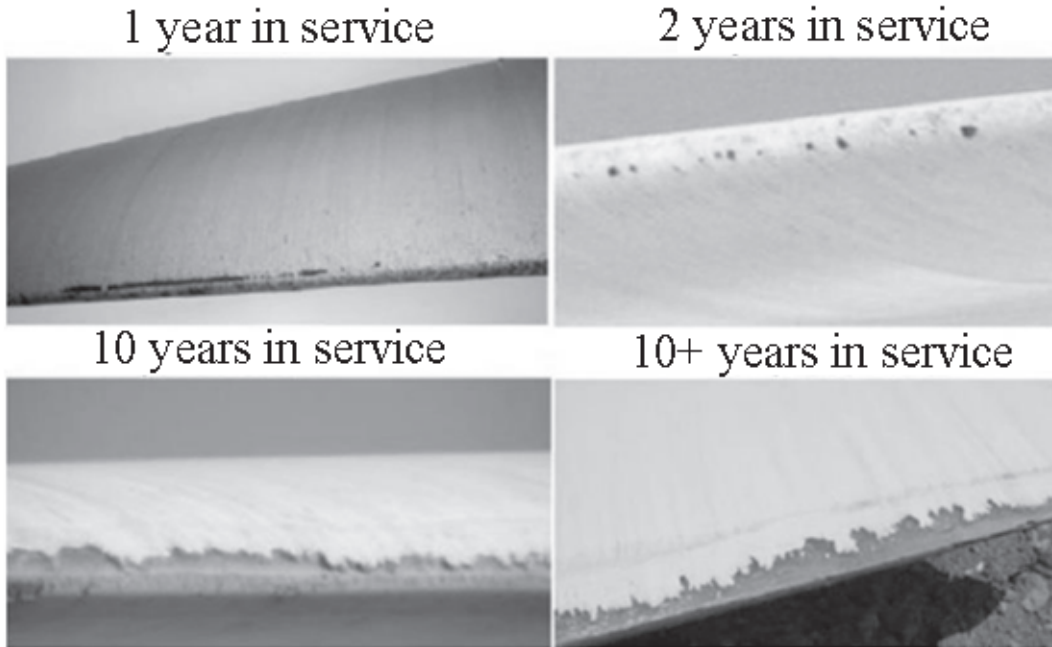
- दूसरे चरण में एपॉक्सी समय-समय पर दिखाई देता है, अर्थात् टॉपकोट ठीक से नहीं हटा है।

- तीसरे और चौथे चरण में टॉपकोट पूरी तरह से बाहर निकाला जाता है।

अग्रणी-किनारे का क्षरण के कारण टरबाइन दक्षता कम हो जाती है और ब्लेड किनारों की सुरक्षा के लिए मरम्मत की आवश्यकता होती है और ब्लेड की गति को सीमित किया जाता है। जेलकोट्स और लचीले कोटिंग्स दोनों का उत्पादन और अनुप्रयोग मैनुअल प्रक्रियाओं पर बहुत निर्भर करता है, जो कोटिंग्स को दोषों के प्रति संवेदनशील बना सकते हैं जोकि कटाव के लिए प्रारंभिक बिंदु के रूप में कार्य कर सकते हैं<sup>30</sup>।

### पवन टरबाइन ब्लेड पर बर्फ का प्रभाव

ठंडी जलवायु में, पवन टरबाइन की सतह पर अक्सर बर्फ का जमाव हो जाता है और सतह को खुरदरेपन को बढ़ाता है, जो बिजली उत्पादन को कम करता है और गंभीर मामलों में टरबाइन को पूर्ण विराम की ओर ले जाता है<sup>31</sup>। बर्फ की परिस्थितियों में पवन पार्कों का एक अनुकूलित और कुशल संचालन एक बहुत ही महत्वपूर्ण मुद्दा बन गया है। जब पवन टरबाइन बर्फीले क्षेत्र में काम कर रहे होते हैं, रोटर ब्लेड्स पर बर्फ का जमाव हो जाता है। रोटर ब्लेड पर असंतुलित बर्फ के जमने से टावर और पूरे टरबाइन पर भार बढ़ता है (चित्र-6)। बर्फ का जमाव, आर्थिक



चित्र 5 – वर्षों के साथ अग्रणी-किनारे का क्षरण

नुकसान के अलावा, रोटर ब्लेड के साथ-साथ आस-पास के जीवित प्राणियों, वाहन और अवसंरचना के लिए खतरा पैदा करता है<sup>32</sup>।

इसलिए, कल्याणकारी और आर्थिक कारणों के लिए, टरबाइन को रोकने या डी-आइसिंग प्रणाली को सक्रिय करने के लिए टरबाइन को पहले रोटर ब्लेड पर तुरंत बर्फ का पता लगाने में सक्षम होना चाहिए<sup>10</sup>। दूसरा, सिग्नल भेजना होता है जो बताता है कि रोटर ब्लेड बर्फ से मुक्त है और इस तरह सामान्य ऑपरेशन फिर से शुरू किया जा सकता है। ठंड के मौसम में आइसिंग ब्लेड की मुख्य समस्याएं माप त्रुटि, बिजली की हानि, यांत्रिक विफलता, बिजली की विफलता और सुरक्षा खतरे हैं<sup>11</sup>।

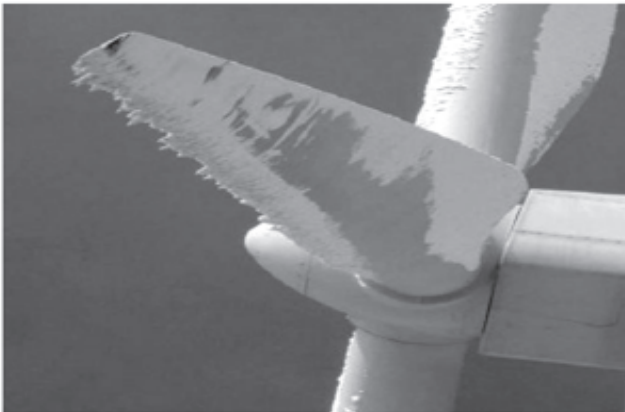
### बिजली निर्वहन

बिजली बादलों, हवा, या जमीन के बीच के वातावरण में एक विशाल चिंगारी है। विपरीत आरोपों के बीच बिजली गिर सकती है, गरज वाले बादल के भीतर (अंतर-बादल बिजली) या बादल और जमीन के बीच (बादल जमीन बिजली) बिजली हो सकती है<sup>33</sup>। बादल के अंदर शुरू होने वाले तूफानों से बिजली चमकती है। बिजली का फ्लैश जमीन पर जाता है, और एक चैनल सतह से नीचे की ओर विकसित होता है<sup>34</sup>। जब एक चिंगारी नीचे के विकासशील चैनल सतह से जाती है, तो एक विशाल विद्युत प्रवाह चैनल को उस वस्तु तक तेजी से नीचे ले जाता है जिससे चिंगारी उत्पन्न होती है<sup>35</sup>। लम्बी वस्तुएं जोड़ने वाली चिंगारी का उत्पादन करने के लिए आस-पास की जमीन की तुलना में अधिक संभावना रखती है<sup>36</sup>।

### पवन टरबाइन ब्लेड संरक्षण रणनीतियाँ

#### पानी की बूंदों/बारिश से संरक्षण रणनीतियाँ

सामान्य ऑपरेशन के तहत पवन टरबाइन ब्लेड से बारिश के पानी के कारण मजबूत कटाव और क्षरण का खतरा होता है।



चित्र 6 – पवन टरबाइन ब्लेड पर बर्फ

ब्लेड, हवा और घूर्णन गति बारिश की बूंदों के प्रभाव वेग को निधिारित करती है। ब्लेड की सतह पर जेल कोट या इलास्टोमरिक कोटिंग्स या टेप का उपयोग किया जाता है, जिसमें क्षरण के प्रतिरोध में सुधार होता है<sup>37</sup>। धातु के ढाल और पॉलीमरिक कोटिंग्स या टेप के उपयोग से, वर्षा का क्षरण कम या समाप्त किया जा सकता है। ब्लेड कोटिंग सिस्टम में आमतौर पर बेस कोट और एक पॉलीयूरेथेन-आधारित लचीला टॉपकोट होता है<sup>25</sup>। पवन टरबाइन ब्लेड के लिए कोटिंग में मौसम की स्थिरता, तापमान में लचीलापन, वर्षा क्षरण प्रतिरोध, एसिड और क्षार संक्षारण प्रतिरोध, रेत प्रतिरोध, उत्कृष्ट आसंजन, नमक स्प्रे प्रतिरोध, नम गर्मी प्रतिरोध, एंटी-आइसिंग, अच्छा निर्माण प्रदर्शन और कम पर्यावरण प्रदूषण होना चाहिए<sup>38</sup>।

पवन टरबाइन ब्लेड के लिए कोटिंग प्रणाली में मुख्य रूप से पानी आधारित कोटिंग प्रणाली और विलायक-आधारित कोटिंग प्रणाली शामिल हैं। पानी आधारित कोटिंग प्रणाली के कई फायदे हैं, जैसे कि कम गंध, पर्यावरण के अनुकूल, निर्माण की सुविधा, उपकरण साफ करने में आसान हैं<sup>39</sup>। तुलनात्मक रूप से, विलायक-आधारित कोटिंग प्रणाली में एक महत्वपूर्ण गंध है और उच्च-ठोस कोटिंग सामग्री उपयोग में ली जाती है<sup>14</sup>। फाइबर-प्रबलित एपॉक्सी राल मैट्रिक्स कंपोजिट से बनाए गए एपॉक्सी इन-मोल्ड जेल कोट और पॉलीउर-ईथेन इन-मोल्ड जेल कोट पवन टरबाइन ब्लेड पर लगाया जाता है<sup>40</sup>।

### अग्रणी-किनारे की संरक्षण रणनीतियाँ

सामान्य रूप से, पवन टरबाइन के संचालन और रख-रखाव की राशि, प्रति किलोवाट यूनिट की कुल लागत का 20%-25% होता है<sup>14</sup>। इसलिए पवन टरबाइन की मरम्मत बहुत महंगा हो जाती है जिसमें प्रमुख पुट्टी का संरक्षण, संरचनात्मक, गैर-संरचनात्मक और चेहरे बिंदु की मरम्मत शामिल है। सभी मरम्मत के मुद्दों में, अग्रणी-किनारे का संरक्षण प्रमुख है<sup>41</sup>। अग्रणी-किनारे का संरक्षण में मुख्य रूप से टरबाइन ब्लेड के प्रमुख किनारे पर सतह कोटिंग या टेप लगाने होते हैं। मोटे तौर पर, दो सतह कोटिंग तकनीक हैं:

(i) **इन-माउंड कोटिंग:** इन-मोल्ड कोटिंग्स में मिश्रित मैट्रिक्स सबस्ट्रेट के समान सामग्री का उपयोग करते हैं, जैसे पॉलीएस्टर या एपॉक्सी<sup>9</sup>। इन-मोल्ड कोटिंग्स पूरे ब्लेड भाग के उत्पाद प्रदर्शन में एक महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है और तरल मिश्रित मोल्डिंग प्रक्रियाओं में उपयोग किया जाता है। ब्लेड निर्माण प्रक्रिया में

एकीकरण की आसानी इसे सरल, लाभप्रद और लागत कम करता है<sup>42</sup>। तैयार उत्पाद को सुदृढीकरण के लिए पर्याप्त रूप से बंधुआ और दीर्घकालिक सुरक्षा प्रदान करना चाहिए

(ii) **पोस्ट-माउंड कोटिंग:** जहां कोटिंग को पेंटिंग और छिड़काव द्वारा लगाया जाता है। उच्च क्षरण प्रतिरोधी इलास्टोमर्स जैसी लचीली सामग्री का उपयोग पेंटिंग और छिड़काव में किया जाता है<sup>10</sup>।

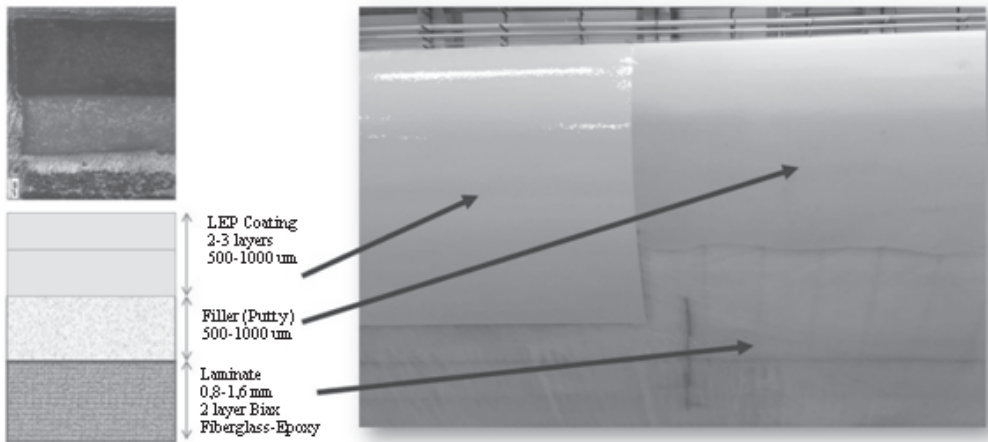
अग्रणी-किनारे का संरक्षण सिस्टम को बहुस्तरीय प्रणाली के रूप में रेखांकित किया जा सकता है, जहां कुछ निर्माताओं में लेमिनेटेड और कोटिंग के बीच एक पुट्टी परत शामिल होती है। कुछ निर्माताओं में जुड़ाव में सुधार करने के लिए कोटिंग के नीचे और पुट्टी पर एक प्राइमर परत भी शामिल होती है<sup>16</sup>। प्रक्रिया की मजबूती और इंटरफेस की कमी के कारण कम कोटिंग परतों वाले कोटिंग की सिफारिश की जाती है (चित्र-7)। अग्रणी किनारे की क्षति की मरम्मत सबसे अधिक बार एक प्राइमर-आधारित परत और प्रोटीन सामग्री के अपरिष्कृत प्रयोग के माध्यम से प्राप्त की जाती है, जिसे चिकना किया जाता है<sup>43</sup>।

#### पवन टरबाइन ब्लेड पर बर्फ की संरक्षण रणनीतियाँ

एंटी बर्फ प्रणाली और डी बर्फ प्रणाली को निष्क्रिय तकनीक और सक्रिय तकनीक में विभाजित किया जा सकता है। निष्क्रिय तकनीक मुख्य रूप से बर्फ के उत्सर्जन को दूर करने या बर्फ के संचय को रोकने के लिए पदार्थ के भौतिक गुणों का उपयोग करती है जबकि सक्रिय तकनीक बाहरी स्थितियों जैसे रसायनों या गर्मी का उपयोग करती है<sup>32</sup>। निष्क्रिय बर्फ संरक्षण तकनीक में, ब्लेड पर हाइड्रोफोबिक कोटिंग का उपयोग किया जाता है

जोकि ब्लेड पर पानी को सोखने से रोकता है और इसलिए ब्लेड पर बर्फ नहीं बनता है। हाइड्रोफोबिक कोटिंग में कम लागत और सुविधाजनक रख-रखाव के फायदे हैं, जो ब्लेड की रख-रखाव लागत को कम कर सकते हैं<sup>31</sup>। वास्तव में, कोई भी कोटिंग पूरी तरह से आइसिंग को रोक नहीं सकती है, लेकिन कीटों को रोकने के लिए कोटिंग एकमात्र तरीका है। ब्लैक पेंट को ब्लेड पर लगाया जाता है, जोकि ब्लेड के तापमान को हीट अवशोषण गुण के कारण बढ़ाता है और इसलिए ब्लेड पर बर्फ नहीं बनता है। आमतौर पर काले रंग का उपयोग हाइड्रोफोबिक कोटिंग के साथ किया जाता है<sup>10</sup>।

सक्रिय बर्फ संरक्षण तकनीक में ऊर्जा, गर्मी, रासायनिक या वायवीय की आपूर्ति की आवश्यकता होती है। अधिकांश तकनीक, ब्लेड को बर्फ के सोखने से रोकती हैं और बर्फ को जमने से रोकने के लिए ब्लेड के तापमान को 0°C से ऊपर रखती हैं<sup>12</sup>। ब्लेड की सतह में छोटे छेद के माध्यम से, हवा को अंदर और ब्लेड की सतह पर परिचालित किया जाता है, ताकि ब्लेड की सतह को हवा से ढक दिया जाए और बूंद को सतह पर गिरने के बजाय बहती हवा से अवरुद्ध कर दिया जाए लेकिन बहने वाली हवा ब्लेड की वायुगतिकीय क्षमताओं को प्रभावित कर सकती है। माइक्रोवेव का उपयोग बर्फ को जमने से रोकने के लिए ब्लेड की सतह के तापमान को बनाए रखने के लिए गर्मी करने की एक विधि भी है<sup>44</sup>। बर्फ की नमी को रोकने के लिए थर्मल तकनीक के उपयोग की तुलना में, अल्ट्रासोनिक एंटी बर्फ प्रणाली और डी बर्फ प्रणाली बहुत कम ऊर्जा की खपत करती है और ब्लेड के वायुगतिकीय प्रदर्शन को प्रभावित नहीं करती है। निष्क्रिय बर्फ संरक्षण तकनीक परेशान करने वाली और ऊर्जा ऊर्जा खपत



चित्र 7 – अग्रणी-किनारे का संरक्षण



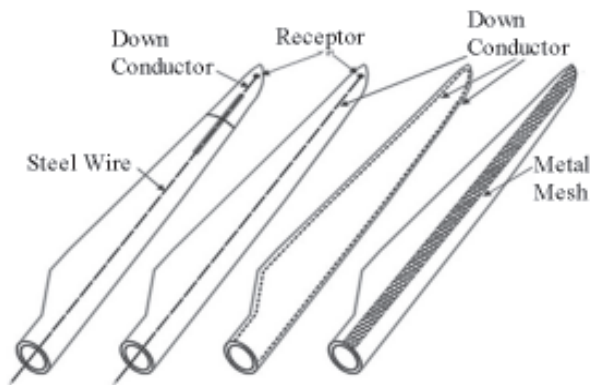
बढ़ाने वाली है। यह आमतौर पर एक सहायक भूमिका निभाता है और सुधार की सीमित गुंजाइश है। सक्रिय बर्फ संरक्षण तकनीक में विद्युत उष्ण कोटिंग्स में कुछ संभावित सुरक्षा खतरे होते हैं, जबकि फोटोथर्मल कोटिंग्स की सीमाएं होती हैं, जबकि हाइड्रोफोबिक कोटिंग्स व्यापक रूप से उपयोग की जाती हैं क्योंकि यह सुरक्षित, गैर प्रदूषणकारी, मजबूत और अच्छे सुधार की गुंजाइश के साथ हैं<sup>45</sup>।

### बिजली निर्वहन से सुरक्षा

हालांकि, ब्लेड गैर-प्रवाहक है, फिर भी यह अपनी ऊंचाई के कारण बिजली को आकर्षित करता है; इसलिए, बिजली संरक्षण आवश्यक है। बिजली की सुरक्षा का स्तर न्यूनतम और अधिकतम अपेक्षित बिजली की धाराओं की संभावना के अनुसार निर्धारित किया जाता है<sup>46</sup>। बिजली सुरक्षा विधियों के मुख्य प्रकार हैं (चित्र-8):

- ब्लेड सतहों पर वायु समाप्ति प्रणाली।
- टिप और एक आंतरिक तार में रखे गए रिसेप्टर्स का इस्तेमाल करंट को हब तक ले जाने के लिए किया जाता है।
- धातु तार को किनारों के चारों ओर, समाप्ति और डाउन कंडक्टर के रूप में काम करने के लिए रखा जाता है।
- ब्लेड के किनारे पर प्रयुक्त धातु की जाली।

पवन टरबाइनों को उनके डिज़ाइन किए गए जीवनकाल के दौरान, रोटर ब्लेड्स पर अधिक मात्रा में बिजली के अटैचमेंट प्राप्त होते हैं<sup>47</sup>। विसंवाहक-आधारित ब्लेड के साथ, ब्लेड की सतह से बिजली को मोड़ने के लिए तार को ब्लेड से बाहर रखा जाता है। साथ ही, ब्लेड के अंदर और विशिष्ट बिंदु पर बाहर रखा जा सकता है। जब कार्बन फाइबर-आधारित ब्लेड का उपयोग किया



चित्र 8 – बिजली निर्वहन से सुरक्षा

जाता है, तो संचालन की एक परत उसके ऊपर रखी जाती है, जो विद्युत प्रवाह को ब्लेड की जड़ तक ले जा सकती है<sup>48</sup>। ब्लेड पर बिजली संरक्षण का मुख्य कार्य है<sup>49</sup>:

- ब्लेड को नुकसान पहुँचाए बिना वर्तमान सुरक्षा का संचालन करने के लिए एक निर्दिष्ट वायु समाप्ति या डाउन कंडक्टर प्रणालीय
- पर्याप्त क्रॉस-सेक्शन कंडक्टर, डायवर्टर और एयर टर्मिनेटर के माध्यम से बिजली के प्रवाह के लिए मार्ग प्रदान करना;
- प्रणाली को नुकसान को रोकना और उच्च धाराओं के कारण उच्च स्तर के चुंबकीय और विद्युत क्षेत्र को कम करना;
- टरबाइन के अंदर और बाहर प्रेरित और उच्च स्तर की वोल्टेज को न्यूनतम करना।

### परिणाम

पवन ऊर्जा टरबाइन ब्लेड बिजली पैदा करने में सबसे बड़ी भूमिका निभाती हैं। पवन टरबाइन कुछ कठोर वातावरणों में काम करते हैं, जहां भारी बारिश, बिजली और बर्फ ब्लेड के अग्रणी किनारे से संपर्क करती है, जिससे क्षरण और कटाव होता है, जो बदले में पवन टरबाइन की परिचालन क्षमता को काफी कम कर देता है। क्षरण और कटाव के प्रभाव से लड़ने से टरबाइन के प्रमुख घटकों दक्षता और विश्वसनीयता बनी रहती है। यह रख-रखाव की लागत को भी कम करता है और खासकर अपतटीय पवन खेतों में के जहां दुर्गमता के टरबाइन की लागत महत्वपूर्ण हो सकती है। विंड टर्बाइन रोटर ब्लेड्स सतह को जेलकोट या पेंट द्वारा संरक्षित किया जाता है। पवन टरबाइन के संरक्षण के लिए मुख्य विधि वर्षा संरक्षण, अग्रणी-किनारे का संरक्षण, बिजली संरक्षण और बर्फ से सुरक्षा है। ब्लेड को दो हिस्सों में बनाया जाता है और उसके बाद एक साथ जोड़ दिया जाता है। टरबाइन ब्लेड में कई प्रकार की सामग्री होती है जैसे कि ग्लास फाइबर प्रबलित प्लास्टिक (GFRP) और सैंडविच ज़ोन जिसमें लकड़ी या प्लास्टिक फोम होते हैं। ब्लेड देख-भाल के दौरान ब्लेड के जीवन को अधिकतम करने और रख-रखाव की लागत को कम करने के लिए, सतह सुरक्षात्मक कोटिंग का चुनाव विशेष रूप से महत्वपूर्ण है। सतह की सुरक्षा और कोटिंग एक जेलकोट या पेंट हो सकती है और इसे असंतृप्त पॉलीएस्टर, एपॉक्सी, पॉलीयुरेथेन या एक्रैलिक से बनाया जा सकता है। कटाव की शुरुआत को कम करने और धीमा करने के प्रयास के लिए कई सुरक्षा समाधान विकसित किए गए हैं। बेहतर समझ के लिए, मौजूदा संरक्षण समाधान प्रस्तुत किए गए हैं और चर्चा की गई है।

## संदर्भ

1. Council, Global Wind Energy. "GWEC| GLOBAL WIND REPORT 2021." (2017).
2. Hosseini, Seyed Ehsan. "An outlook on the global development of renewable and sustainable energy at the time of Covid-19." *Energy Research & Social Science* **68** (2020): 101633.
3. Dalili, N., Afsaneh Edrisy, and Rupp Carriveau. "A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance." *Renewable and Sustainable energy reviews* **13**, no. **2**(2009): 428-438.
4. Du, Ying, Shengxi Zhou, Xingjian Jing, Yeping Peng, Hongkun Wu, and Ngaiming Kwok. Damage detection techniques for wind turbine blades: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing* **141** (2020): 106445.
5. Brondsted, Povl, and Rogier PL Nijssen, eds. "Advances in wind turbine blade design and materials." (2013).
6. Sørensen, Bent F., Erik Joergensen, Christian P. Debel, F. M. Jensen, H. M. Jensen, T. Jacobsen, and K. M. Halling. "Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects (Phase 1)-Summary report." (2004).
7. Ghoshal, Anindya, Mannur J. Sundaresan, Mark J. Schulz, and P. Frank Pai. "Structural health monitoring techniques for wind turbine blades." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **85**, no. **3**(2000): 309-324.
8. Heymann, F. J. "Liquid impingement erosion, ASM Handbook, vol. 18, ASM International, Materials Park." (1992): 221-232.
9. Keegan, Mark Hugh, D. H. Nash, and M. M. Stack. "On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades." *Journal of Physics D: Applied Physics* **46**, no. **38** (2013): 383001.
10. Lorenzo, Emilio Di, Giuseppe Petrone, Simone Manzato, Bart Peeters, Wim Desmet, and Francesco Marulo. "Damage detection in wind turbine blades by using operational modal analysis." *Structural Health Monitoring* **15**, no. **3**(2016): 289-301.
11. Malekimoghadam, Reza, Stefan Krause, and Steffen Czichon. "A Critical Review on the Structural Health Monitoring Methods of the Composite Wind Turbine Blades." *In Proceedings of 1st International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment*, pp. 409-438. Springer, Singapore, 2020.
12. Mishnaevsky, Leon, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, Malcolm McGugan, and Bent F. Sørensen. "Materials for wind turbine blades: an overview." *Materials* **10**, no. **11**(2017): 1285.
13. Thomas, Lijin, and M. Ramachandra. "Advanced materials for wind turbine blade-A Review." *Materials Today: Proceedings* **5**, no. **1**(2018): 2635-2640.
14. Elhadi Ibrahim, Mohamed, and Mamoun Medraj. "Water droplet erosion of wind turbine blades: Mechanics, testing, modeling and future perspectives." *Materials* **13**, no. **1** (2020): 157.
15. Mishnaevsky Jr, Leon. "Repair of wind turbine blades: Review of methods and related computational mechanics problems." *Renewable energy* **140** (2019): 828-839.
16. Mishnaevsky Jr, Leon, Charlotte Bay Hasager, B. A. K. Christian, T. I. L. G. Anna-Maria, Saeed DOAGOU RAD, and Søren FÆSTER. "Leading edge erosion of wind turbine blades: Understanding, prevention and protection." *Renewable Energy* (2021).
17. Shankar Verma, Amrit, Zhiyu Jiang, Zhengru Ren, Weifei Hu, and Julie JE Teuwen. "Effects of on-shore and offshore environmental parameters on the leading edge erosion of wind turbine blades: a comparative study." *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* **143**, no. **4**(2021): 042001.
18. Hamed, Awatef A., Widen Tabakoff, Richard B. Rivir, Kaushik Das, and Puneet Arora. "Turbine blade surface deterioration by erosion." (2005): 445-452.
19. Zhang, Shizhong, Kim Dam-Johansen, Pablo L. Bernad Jr, and Søren Kiil. "Rain erosion of wind turbine blade coatings using discrete water jets: Effects of water cushioning, substrate geometry, impact distance, and coating properties." *Wear* **328** (2015): 140-148.
20. Burson-Thomas, Charles B., Richard Wellman, Terry J. Harvey, and Robert JK Wood. "Importance of surface curvature in modeling droplet impingement on fan blades." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **141**, no. **3**(2019).

21. Fujisawa, Kei, Takayuki Yamagata, and Nobuyuki Fujisawa. "Liquid droplet impingement erosion on groove roughness." *Nuclear Engineering and Design* **330**(2018): 368-376.
22. Gujba, A. K., L. Hackel, D. Kevorkov, and M. Medraj. "Water droplet erosion behaviour of Ti-6Al-4V and mechanisms of material damage at the early and advanced stages." *Wear* **358**(2016): 109-122.
23. Kirols, H. S., D. Kevorkov, A. Uihlein, and M. Medraj. "Water droplet erosion of stainless steel steam turbine blades." *Materials Research Express* **4**, no. **8**(2017): 086510.
24. Ryzhenkov, V. A., A. I. Lebedeva, and A. I. Mednikov. "Erosion wear of the blades of wet-steam turbine stages: Present state of the problem and methods for solving it." *Thermal engineering* **58**, no. **9** (2011): 713-718.
25. Chen, Junlei, Jihui Wang, and Aiqing Ni. "A review on rain erosion protection of wind turbine blades." *Journal of Coatings Technology and Research* **16**, no. **1** (2019): 15-24.
26. Castorrini, Alessio, Alessandro Corsini, Franco Rispoli, Paolo Venturini, Kenji Takizawa, and Tayfun E. Tezduyar. "Computational analysis of wind-turbine blade rain erosion." *Computers & Fluids* **141** (2016): 175-183.
27. Eisenberg, Drew, Steffen Laustsen, and Jason Stege. "Wind turbine blade coating leading edge rain erosion model: Development and validation." *Wind Energy* **21**, no. **10**(2018): 942-951.
28. Han, Woobeom, Jonghwa Kim, and Bumsuk Kim. "Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines." *Renewable energy* **115**(2018): 817-823.
29. Rempel, Lisa. "Rotor blade leading edge erosion-real life experiences." *Wind Systems Magazine* **11** (2012): 22-24.
30. Sareen, Agrim, Chinmay A. Sapre, and Michael S. Selig. "Effects of leading edge erosion on wind turbine blade performance." *Wind Energy* **17**, no. **10** (2014): 1531-1542.
31. Ciang, Chia Chen, Jung-Ryul Lee, and Hyung-Joon Bang. "Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods." *Measurement science and technology* **19**, no. **12** (2008): 122001.
32. Madi, Ezieddin, Kevin Pope, Weimin Huang, and Tariq Iqbal. "A review of integrating ice detection and mitigation for wind turbine blades." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **103** (2019): 269-281.
33. Ayub, Ahmad Syahrir, Wah Hoon Siew, and S. J. MacGregor. "Lightning protection of wind turbine blades-An alternative approach." In *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*, pp. 941-946. IEEE, 2011.
34. Li, Dongsheng, Siu-Chun M. Ho, Gangbing Song, Liang Ren, and Hongnan Li. "A review of damage detection methods for wind turbine blades." *Smart Materials and Structures* **24**, no. **3** (2015): 033001.
35. Rachidi, Farhad, Marcos Rubinstein, Joan Montanya, Jose-Luis Bermudez, Ruben Rodriguez Sola, Gloria Sola, and Nikolay Korovkin. "A review of current issues in lightning protection of new-generation wind-turbine blades." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **55**, no. **6**(2008): 2489-2496.
36. Rachidi, Farhad, Marcos Rubinstein, and Alexander Smorgonskiy. "Lightning protection of large wind-turbine blades." In *Wind Energy Conversion Systems*, pp. 227-241. Springer, London, 2012.
37. Cortés, Enrique, Fernando Sánchez, Anthony O'Carroll, Borja Madramany, Mark Hardiman, and Trevor M. Young. "On the material characterisation of wind turbine blade coatings: the effect of inter-phase coating-laminate adhesion on rain erosion performance." *Materials* **10**, no. **10**(2017): 1146.
38. Mishnaevsky Jr, Leon, and Jan Sütterlin. "Micromechanical model of surface erosion of polyurethane coatings on wind turbine blades." *Polymer Degradation and Stability* **166**(2019): 283-289.
39. Dashtkar, Arash, Homayoun Hadavinia, M. Necip Sahinkaya, Neil A. Williams, Samireh Vahid, Fanya Ismail, and Matthew Turner. "Rain erosion-resistant coatings for wind turbine blades: A review." *Polymers and Polymer Composites* **27**, no. **8** (2019): 443-475.

40. Fæster, Søren, Nicolai Frost, Jensen Johansen, Leon Mishnaevsky Jr, Yukihiro Kusano, Jakob Ilsted Bech, and Martin Bonde Madsen. "Rain erosion of wind turbine blades and the effect of air bubbles in the coatings." *Wind Energy* (2021).
41. Finnegan, William, Tomas Flanagan, and Jamie Goggins. "Development of a Novel Solution for Leading Edge Erosion on Offshore Wind Turbine Blades." In *Proceedings of the 13th International Conference on Damage Assessment of Structures*, pp. 517-528. Springer, Singapore, 2020.
42. Herring, Robbie, Kirsten Dyer, Paul Howkins, and Carwyn Ward. "Characterisation of the offshore precipitation environment to help combat leading edge erosion of wind turbine blades." *Wind Energy Science* 5, no. 4(2020): 1399-1409.
43. Slot, H. M., E. R. M. Gelinck, C. Rentrop, and Emile Van Der Heide. "Leading edge erosion of coated wind turbine blades: Review of coating life models." *Renewable Energy* 80(2015): 837-848.
44. Smarsly, Kay, Dietrich Hartmann, and Kincho H. Law. "A computational framework for life-cycle management of wind turbines incorporating structural health monitoring." *Structural health monitoring* 12, no. 4(2013): 359-376.
45. Tsiapoki, Stavroula, Moritz W. Häckell, Tanja Griebmann, and Raimund Rolfes. "Damage and ice detection on wind turbine rotor blades using a three-tier modular structural health monitoring framework." *Structural Health Monitoring* 17, no. 5(2018): 1289-1312.
46. Shohag, Md Abu S., Emily C. Hammel, David O. Olawale, and Okenwa I. Okoli. "Damage mitigation techniques in wind turbine blades: A review." *Wind Engineering* 41, no. 3(2017): 185-210.
47. Yasuda, Yoh, Shigeru Yokoyama, Masayuki Minowa, and Tomoyuki Satoh. "Classification of lightning damage to wind turbine blades." *IEEE transactions on electrical and electronic engineering* 7, no. 6 (2012): 559-566.
48. Zhang, Jiangong, Gang Liu, Tang Bo, Xingfa Liu, Ziyi Liu, and Bocheng Li. "Analysis of Lightning Strike Characteristics and Electromagnetic Environment of Wind Turbine Blades." In *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, pp. 686-689. IEEE, 2019.
49. Guo, Zixin, Qingmin Li, Yufei Ma, Hanwen Ren, Zhiyang Fang, Chun Chen, and Wah Hoon Siew. "Experimental study on lightning attachment manner to wind turbine blades with lightning protection system." *IEEE Transactions on Plasma Science* 47, no. 1 (2018): 635-646.